第 38 卷第 9 期
2018 年 5 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38,No.9
May,2018

DOI: 10.5846/stxb201703160442

刘英,雷少刚,程林森,程伟,卞正富.采煤塌陷影响下土壤含水量变化对柠条气孔导度、蒸腾与光合作用速率的影响.生态学报,2018,38(9):3069-3077.

Liu Y, Lei S G, Cheng L S, Cheng W, Bian Z F.Effects of soil water content on stomatal conductance, transpiration, and photosynthetic rate of *Caragana korshinskii* under the influence of coal mining subsidence.Acta Ecologica Sinica,2018,38(9):3069-3077.

采煤塌陷影响下土壤含水量变化对柠条气孔导度、蒸腾与光合作用速率的影响

刘　英,雷少刚*,程林森,程　伟,卞正富

中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州　221116

摘要:采煤塌陷引起的土壤环境因子的变化对矿区植物生长的影响越来越受到人们的关注,气孔导度、蒸腾与光合作用作为环境变化响应的敏感因子,研究植物气孔导度、蒸腾与光合作用的变化是揭示荒漠矿区自然环境变化及其规律的重要手段之一。研究采煤塌陷条件下植物光合生理的变化是探究煤炭开采对植物叶片水分蒸腾散失和 CO_2 同化速率影响的关键环节,是探讨采煤塌陷影响下植物能量与水分交换动态的基础,而采煤矿区植物叶片气孔导度、蒸腾与光合作用速率对采煤塌陷影响下土壤含水量变化的响应如何尚不清楚。选取神东煤田大柳塔矿区 52302 工作面为实验场地,以生态修复物种柠条为研究对象,对采煤塌陷区和对照区柠条叶片气孔导度、蒸腾和光合作用速率以及土壤体积含水量进行监测,分析了采煤塌陷条件下土壤含水量的变化以及其对柠条叶片气孔导度、蒸腾与光合作用速率的影响。结果显示:(1)煤炭井工开采在地表形成大量裂缝,破坏了土体结构,潜水位埋深降低,土壤含水量均低于沉陷初期,相对于对照区,硬梁和风沙塌陷区土壤含水量分别降低了 18.61%、21.12%;(2)柠条叶片气孔导度、蒸腾和光合作用速率均与土壤含水量呈正相关关系;煤炭开采沉陷增加了地表水分散失,加剧了土壤水分胁迫程度,为了减少蒸腾导致的水分散失,柠条叶片气孔阻力增加,从而气孔导度降低,阻碍了光合作用 CO_2 的供应,从而导致柠条叶片光合作用速率的降低,蒸腾速率也显著降低。

关键词:干旱区;采煤塌陷;气孔导度;胞间 CO_2 浓度;干旱胁迫

Effects of soil water content on stomatal conductance, transpiration, and photosynthetic rate of *Caragana korshinskii* under the influence of coal mining subsidence

LIU Ying, LEI Shaogang*, CHENG Linsen, CHENG Wei, BIAN Zhengfu

School of Environment Science and Spatial Information, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: Increased attention has been paid to the influence of environmental factors caused by coal mining subsidence on plant physiology. Stomatal conductance, transpiration and rate of photosynthesis are factors sensitive to the environment, therefore it is important to study of the change in stomatal conductance, transpiration, and photosynthetic rate to reveal the change of natural environment in the mining area. Investigation of the changes in stomatal conductance, transpiration, and photosynthetic rate under the condition of coal mining subsidence is a key step to explore the effects of coal mining on water transpiration and CO_2 assimilation rate. It is concluded that the relationships between stomatal conductance, transpiration, and photosynthetic rate and environmental factors in coal mining subsidence areas are the basis of the relationship between energy and water exchange under the influence of coal mining subsidence. However, the responses of stomatal conductance,

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0501107);国家自然科学基金重点项目(U1361214);国家重点基础研究发展计划(973)课题(2013CB227904)

收稿日期:2017-03-16;　　**网络出版日期:**2018-01-26

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: lsgang@126.com

transpiration, and photosynthetic rate to the change in soil water content are not clear in coal mining subsidence areas. The 52302 working face of the Daliuta mining area was selected as the experimental site, with *Caragana korshinskii* as the research object. Stomatal conductance, transpiration and rate of photosynthesis in *C. korshinskii* leaves and soil water content were monitored in a coal mining subsidence area and a non-collapse area. The characteristics of the responses of stomatal conductance, transpiration, and photosynthetic rates of *C. korshinskii* leaves to soil water content were analyzed. The results show that: (1) Coal mining resulted in surface cracking, soil structure damage and diving depth reduction. Soil water content was lower than that in the early stage of the subsidence. Compared with the control area, the soil moisture contents of the hard ground and the aeolian sandy land subsidence area were decreased by 18.61% and 21.12%, respectively. (2) The stomatal conductance, transpiration, and photosynthetic rate of *C. korshinskii* leaves were positively correlated with soil water content. Subsidence of coal mining area increased the loss of surface water and intensified the degree of soil water stress. In order to reduce transpiration caused by water loss, *C. korshinskii* leaf stomatal resistance increased, stomatal conductance decreased, and CO_2 supply for photosynthesis was hindered, which led to the reduced *C. korshinskii* leaf photosynthetic and transpiration rates.

Key Words: arid area; coal mining subsidence; stomatal conductance; intercellular CO_2 concentration; drought stress

煤炭是我国重要的能源来源,在我国一次性能源消费结构中所占的比例为70%左右[1],我国95%以上的煤炭开采采取井工开采的方式,导致矿区大面积的塌陷下沉[2],对生态环境造成严重破坏。近年来,煤炭开采的重心逐渐向西部转移,这使得处于干旱半干旱气候本就脆弱的矿区生态环境日趋恶化[3],其中最直观的体现就是对植被的影响。现代化高强度作业已经对地表植被产生了极大的负面影响,植被盖度相对于非采区要低;矿区开采中地表形成大量的地裂缝和大面积的采空塌陷区,裂缝密集带土壤水含量要明显低于裂缝密度低的区域,并且塌陷区土壤养分含量较对照区明显降低[4],同时由于地表裂缝影响,导致植物根际微生物和酶活性内在联系发生改变[5],以及对植物根系的拉伤[6],影响植物根系对水分和养分的吸收,地表土壤物理化学性质改变,矿区水土流失等进一步恶化,植被生长环境发生逆向改变,这些都在不同程度上影响了植物的生长[7-8]。目前对于采煤塌陷对植物影响研究主要集中在植被生物量[9]、覆盖度[10]、多样性分析以及开采引起土体损伤对其间接影响[11],而对采煤塌陷影响下土壤含水量变化对植物气孔导度、蒸腾与光合作用速率的影响研究较少。

随着陆地-大气相互作用中植被的作用逐渐被认识,关于胁迫下植物生理指标对环境因子的响应成为研究热点,许多学者对干旱胁迫下植物生理指标对环境因子的响应进行了研究[12-15]。气孔是高等植物与大气进行水汽交换的主要通道,是吸收空气中CO_2的入口,也是水蒸气逸出叶片的主要出口,气孔导度的开放程度直接影响植物的蒸腾速率与光合作用,气孔导度在控制碳吸收与水分平衡中有关键作用[16],同时气孔导度的运动状况在一定程度上反应了植物体内的代谢情况,其灵敏度是植物体内受胁迫的一个重要表征[17]。植物根系吸收的水分一部分通过叶片蒸腾作用散失,一部分参与植物的生理活动,因此,蒸腾作用对于植物维持体内水分平衡具有重要意义[18]。光合作用是植物将光能转化为化学能合成有机质的生物过程,而土壤含水量的变化直接影响植物叶片的光合作用,土壤水分胁迫导致植物光合速率的变化,进而影响植物的生物量和生产力[19]。因此,研究采煤塌陷条件下植物气孔导度、蒸腾以及光合作用速率的变化是探究开采沉陷对植物叶片水分蒸腾散失和CO_2同化速率影响的关键环节,弄清采煤塌陷区植物叶片气孔导度、蒸腾以及光合作用速率与土壤含水量之间的相互关系是探讨采煤塌陷影响下植物能量与水分交换动态的基础。

神府-东胜煤田地处黄土高原,毛乌素沙漠边缘地带,属于典型的半干旱、半沙漠的高原大陆性气候。辐射强且日照时间长,水分亏缺生态环境十分脆弱。该煤田探明储量354.22亿t,是中国已探明储量最大的煤田,为世界七大煤田之一。近年来,该矿区采煤塌陷对植被的影响引起不少学者的广泛关注。本文通过对矿区内采煤塌陷地进行植物调查研究,选择矿区典型生态修复植物柠条(*Caragana korshinskii*)为研究对象,根据

塌陷区、非塌陷区土壤含水量的差异以及柠条叶片气孔导度、蒸腾以及光合作用速率变化特征,对比分析柠条气孔导度、蒸腾与光合作用速率对土壤含水量变化的响应规律,为该地区生态治理提供植被保护的理论依据,同时也为矿区进一步的生态建设提供理论依据。

1　研究区域概况

实验场地位于内蒙古伊金霍洛旗镇的大柳塔矿区,地理坐标为 110°05′00″—110°20′00″E(图 1),39°27′00″—39°15′00″N,面积约 376km^2,多年平均气温 7.3℃。该区地处晋、陕、蒙三省接壤处,位于毛乌素沙漠东部边缘,气候干燥少雨,年平均降雨量和蒸发量分别为 413.5mm 和 2111.2mm,属于典型的干旱、半干旱的高原大陆性气候。由于人类的生产活动,矿区原始植被早已破坏殆尽,代之以人工修复物种。研究区域植被类型主要有干草原型、落叶阔叶灌木丛型和沙生类型势,以油蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条(*Caragana korshinskii*)为代表的沙生植被组合,主要生长于半固定沙地、固定沙地和沙地沙丘间低地,土壤以风沙土和硬梁土为主,结构较疏松,抗蚀性差,极易遭受风蚀。(风沙土:发育于风成沙性母质的土壤,处于土壤发育的初始阶段,成土过程微弱,通体细沙,植被易于破坏,随起沙风而移动,其主要特征是土壤矿质部分几乎全由细砂颗粒组成。硬梁土与风沙土类似,主要分布在我国西北部和内蒙古自治区,主要特点是细砂粒占土壤矿质部分总量的65%—85%,而粗砂粒、粉粒及粘粒的含量低,土壤有机质含量极低。)

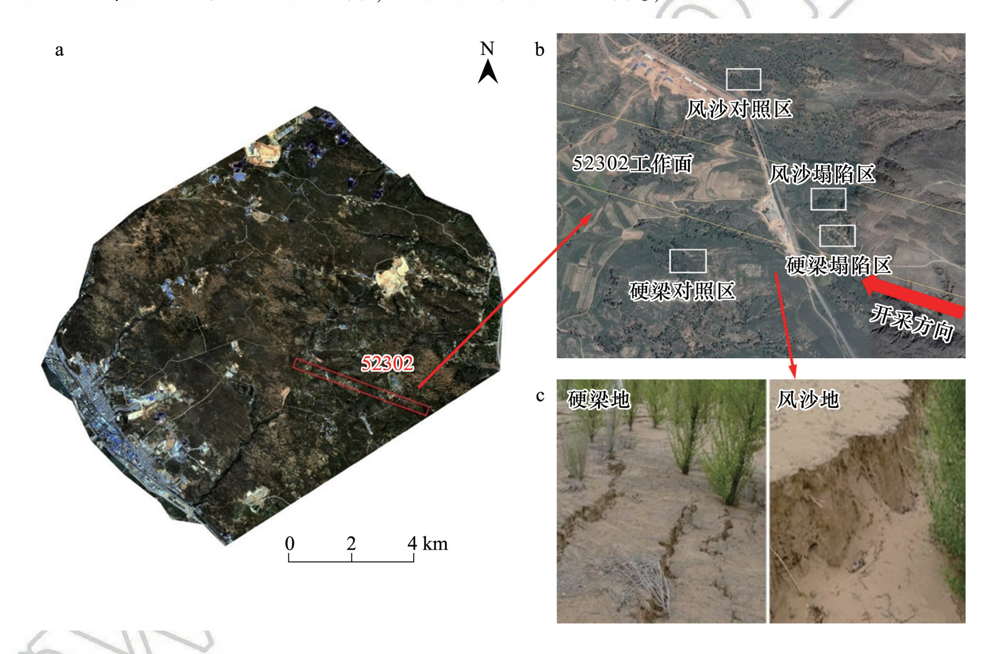


图 1　研究区域位置图

Fig.1　The locations of the study region

a. 52302 工作面的位置;b. 试验地点的位置图;c. 煤矿开采沉陷区

本文选取的 52302 工作面,地面位置位于大柳塔矿井田的东南区域三盘区,煤层赋存条件呈现出浅埋深、厚煤层以及近水平等特点,地表被厚松散层覆盖,采用长臂开采、垮落式管理顶板的开采方式,日推进速度可达 12m 左右,属于典型的高强度、超大工作面开采的范畴。近年来,矿区大规模的煤炭开采对地表环境造成了明显的影响,如:地表塌陷产生地裂缝群、水土流失、耕地退化、生产力降低等,而这些采煤活动势必会直接或者间接的对矿区地表植物的生长造成影响。

2　材料与方法

2.1　地面沉降信息调查

根据开采沉陷水平移动与变形理论(图 2)[20],局部矿体被采出后,在岩体内部形成一个空洞,其周围原

有应力平衡状态受到破坏,引起应力的重新分布,直至达到新的平衡。随着采矿工作面的不断推进,受采动影响的岩层范围不断扩大,当开采范围足够大时,岩层移动发展到地表,在地表形成一个比采空区大得多的下沉盆地。52303 工作面尺寸为 4484m×300m,地面高程 1162.4—1255.3m,地面标高 985.13—1020.99m,煤层平均厚度 7m,地面水平移动系数 0.26,最大裂缝宽度 42cm,倾角 1°—3°,表层土壤厚 30m,下沉系数 0.76,最大下沉值 4833mm,煤炭开采速度 10m/d,开采深厚比 33.57。通过对走向观测站的监测结果来判定测点位置的地表沉陷情况,对于观测站的监测结果如图 2 所示,测点(z01—z25)位置在 3 月 26 号之前就已经受到开采影响而开始下沉,4 月 5 号还未达到最大下沉值,之后处于下沉活跃期,到 4 月 26 号已经处于相对稳沉状态。

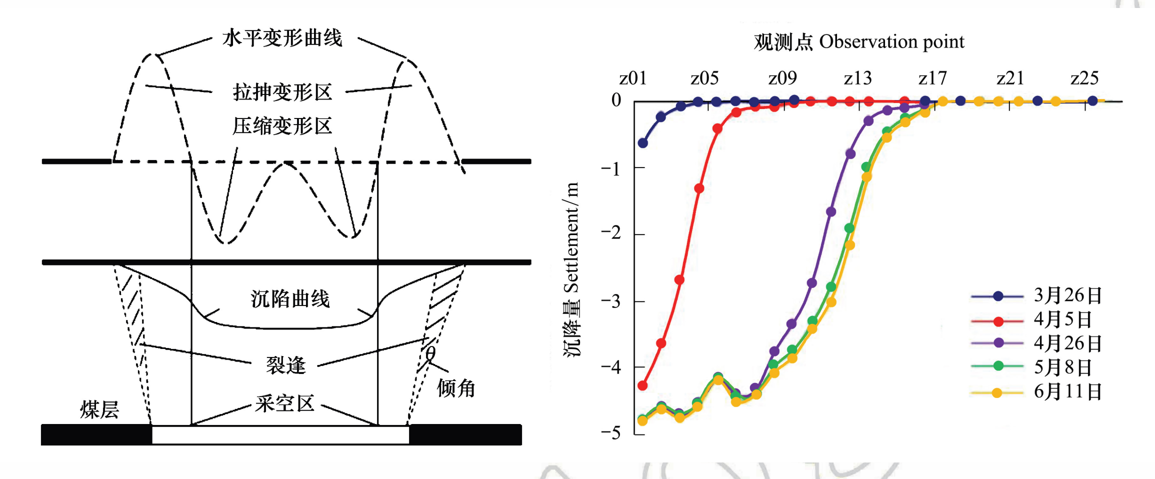


图 2 开采沉陷的水平移动与变形理论与走向观测站沉降量监测结果

Fig.2 The horizontal movement and deformation theory of mining subsidence and the subsidence result of monitoring station

2.2 样地与植物选择

以大柳塔矿区 52302 工作面为研究区(图 1);样地选择主要根据风沙土和硬梁土两种土壤类型(均处于塌陷中后期),在研究区内分别设立硬梁地塌陷区、风沙地塌陷区、硬梁地对照、风沙地对照 4 块样地,其中对照样地与采区样地地貌植被基本一致,海拔在 1256.32—1254.52m 之间,坡向为东南坡,坡度 1°—3°。采区样地位于拉伸变形区。柠条是大柳塔矿区主要的生态修复植物物种,研究其在煤炭开采条件下气孔导度与环境因子的响应特征具有重要意义;通过现场调查发现,柠条在采煤塌陷区具有明显的数量优势,种群密度较其他植物大且在硬梁地和风沙区皆有分布,因此本文选取柠条作为研究对象。通过对所选植物根部土壤进行取样,测得样地土壤养分含量以及颗粒组成信息(表 1)。表 1 中硬梁塌陷区土壤有机质、全氮、铵态氮的相对其他样地明显较高,这可能与研究区域土壤性质的空间异质性有关。此外,风沙区土壤砂粒含量明显高于硬梁地。

表 1 样地土壤养分含量以及颗粒组成信息

Table 1 Soil nutrient content and grain composition information

项目 Project	有机质 Organic matter/(g/kg)	全氮 Total Nitrogen/(g/kg)	全磷 Total Phosphorus/(g/kg)	铵态氮 Ammonium Nitrogen/(mg/kg)	容重 Bulk Density/(g/cm^3)	砂粒 Sand/%	粉粒、粘粒 Silt and clay/%
硬梁对照区 Hard beam control area	3.11	0.22	0.25	1.95	1.53	77.32	22.68
硬梁塌陷区 Hard beam collapse area	5.59	0.49	0.34	2.22	1.60	78.61	21.39
风沙对照区 Sandy land control area	2.44	0.22	0.19	1.95	1.65	82.91	17.09
风沙塌陷区 Sandy land subsidence area	3.66	0.26	0.33	1.62	1.65	84.13	15.87

2.3　数据采集

2015 年 5 月中旬,根据树冠不受遮蔽原则,分别在每个样地内选取长势较一致、树龄 5—6 年、株高 1m 左右的柠条 3 株,沿植株垂直方向从上(0—30cm)中(30—60cm)到下(60—90cm)对成熟叶片进行光合作用参数测定,每株柠条每个选定叶片做 3 个重复,结果取平均。选择晴朗无云的天气,利用 LCI-SD 便携式光合仪(Li-Cor Inc., USA)对选定的柠条叶片测定气孔导度(Gs)、蒸腾速率(E)以及光合作用速率(A),同样测取 3 个重复,结果取平均。利用 ML3X 土壤水分速测仪(Delta-T Inc., UK)同步测定表层 0—20cm 土壤体积含水量,土壤水分速测仪在测定前用烘干法标定。测定时间为上午 8:00—18:00,每隔 1h 测定一次。利用英国 PR2(Profile Probe type PR2)土壤剖面水分速测仪对植物根系土壤含水量进行连续监测,每 30 分钟监测一次,可以分别监测到 10、20、30、40、60cm 和 100cm 处土壤体积含水量的变化;监测时间区间为 3 月 16 号到 6 月 3 号,即监测点受地下开采影响前至沉陷相对稳定后一段时间,获得了监测点在受到地下开采影响前后 0—100cm 不同深度土壤含水量的数据。

2.4　数据处理

采用 Excel 2010 对数据进行统计;采用 Origin 9.1 软件进行数据整理和制图。

3　实验结果

3.1　采煤塌陷影响下土壤含水量的变化特征

采煤塌陷影响下土壤含水量的变化特征通过采煤塌陷过程土壤剖面含水量的变化以及两种土壤类型塌陷区与对照区表层 0—20cm 土壤含水量进行统计得出,统计结果见图 3。

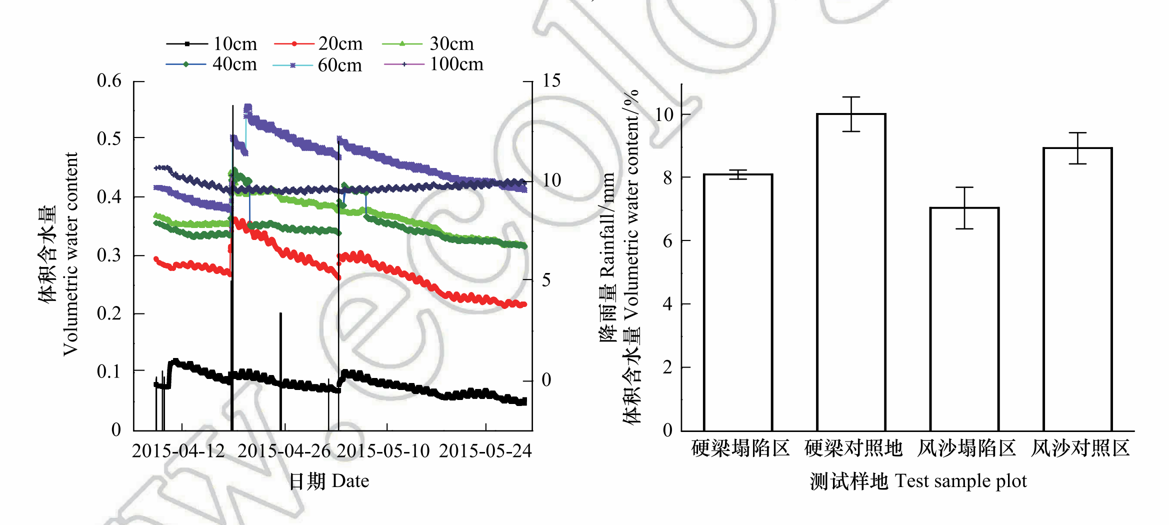


图 3　采煤塌陷过程土壤含水量的变化,塌陷区与对照区土壤含水量对比

Fig.3　Changes of water content in different soil layers during coal mining subsidence, Comparison of soil water content between coal subsidence area and control area

从图 3 土壤剖面水分速测仪对植物根系土壤含水量进行连续监测结果可以看出,除表层 0—10cm 土壤含水量低于塌陷稳定期外,其他土壤层采煤沉陷后含水量均低于沉陷初期,在此期间,4 月 25 日和 5 月 9 日降雨量分别为 13.8mm 和 12.0mm,土壤含水量有小幅升高,但是从整体来看,受采煤塌陷影响土壤含水量呈降低趋势。进一步对表层 0—20cm 土壤平均含水量进行统计图 3,得到硬梁地塌陷地、硬梁地对照区、风沙地塌陷区、风沙地塌陷区平均土壤含水量分别为:8.13%、10.05%、7.07%、8.97%,标准差分别为 0.14、0.54、0.66、0.49;与对照区相比,塌陷区平均土壤含水量明显较低,其中硬梁塌陷区土壤含水量降低了 18.61%,风沙塌陷区土壤含水量降低了 21.12%;从整体来看,硬梁地土壤含水量高于风沙地土壤含水量。主要在于相对于硬梁土,风沙土本身更不利于保水,加之煤炭开采引起地表塌陷,增加了土壤水分蒸发散失。

3.2 采煤塌陷影响下土壤含水量变化对柠条气孔导度的影响

气孔是植物叶片与外界环境进行气体、水分交换的重要通道，在调节植物水分状况中起关键作用，在受到环境胁迫的条件下，植物会适时做出各种响应以减轻胁迫。为了探究柠条叶片气孔导度对采煤条件下土壤含水量变化的响应规律，本文对柠条叶片气孔导度与土壤含水量(SWC)的相互关系进行拟合，拟合结果见图4。由土壤体积含水量与气孔导度的关系图4可以看出，土壤体积含水量在6%—13%之间，与气孔导度呈正相关关系，随着土壤体积含水量的增加，柠条叶片气孔导度值升高。通过对土壤体积含水量与气孔导度进行回归分析得到：硬梁塌陷地、硬梁地对照区、风沙地塌陷区、风沙地塌陷区气孔导度与土壤体积含水量的回归方程分别为：$y=0.2764x-2.0108$($R^2=0.3523$)、$y=0.0662x-0.3385$($R^2=0.5860$)、$y=0.0777x-0.4149$($R^2=0.3396$)和 $y=0.0482x-0.1036$($R^2=0.5462$)。采煤塌陷影响下，塌陷地土壤体积含水量与气孔导度值均低于对照区，原因主要与受采煤塌陷影响，在地表形成裂缝，增加了水分蒸发，植物受到水分胁迫，为了减少水分散失，叶片气孔导度关闭有关。

3.3 采煤塌陷影响下土壤含水量变化对柠条蒸腾速率的影响

土壤含水量与柠条叶片蒸腾速率的拟合关系见图5，从图5可以看出，通过对土壤体积含水量与蒸腾速率进行回归分析得到：硬梁塌陷地、硬梁地对照区、风沙地塌陷区、风沙地塌陷区气孔导度与土壤体积含水量的回归方程分别为：$y=1.2303x-2.5450$($R^2=0.2584$)、$y=0.5092x-6.0207$($R^2=0.1109$)、$y=2.6555x-14.4123$($R^2=0.4185$)、$y=0.5054x-4.1771$($R^2=0.4721$)。土壤含水量与蒸腾速率呈正相关关系，随着土壤含水量的增加，柠条叶片蒸腾速率升高。采煤塌陷影响下，塌陷区柠条叶片蒸腾速率明显低于对照区，且对风沙区蒸腾速率的影响更大，风沙塌陷区柠条叶片蒸腾最低只有 1.11mmol $m^{-2}s^{-1}$，而硬梁塌陷区柠条叶片蒸腾速率降低幅度相对较小。塌陷区柠条叶片蒸腾速率降低主要与土壤水分供应不足，植物为了减少水分散失，气孔导度降低，从而导致叶片蒸腾速率降低有关。

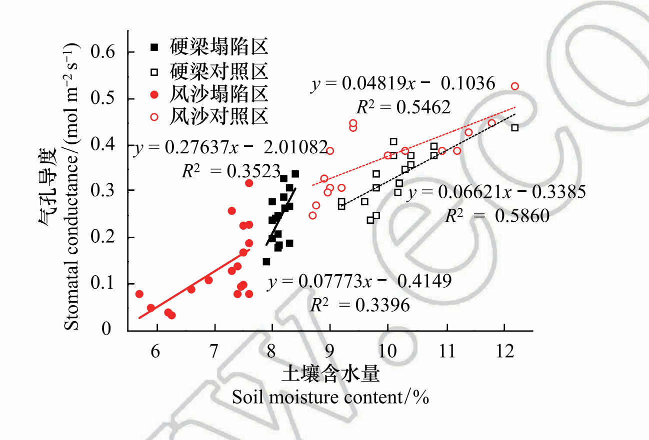


图4 土壤含水量变化与柠条气孔导度的关系拟合

Fig.4 Relationship between the changes of soil water content and *Caragana korshinskii* stomatal conductance

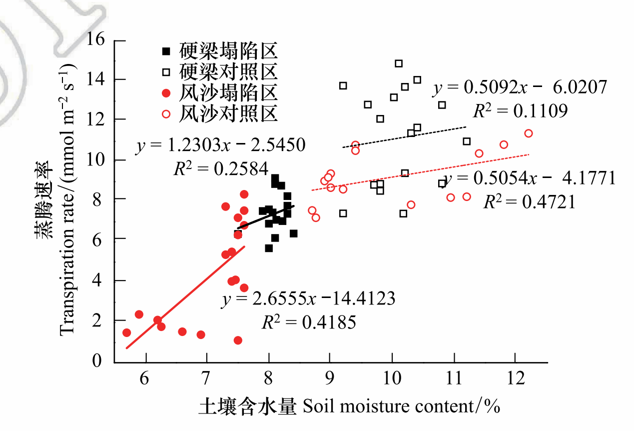


图5 土壤含水量变化与柠条蒸腾速率的关系拟合

Fig.5 Relationship between the changes of soil water content and *Caragana korshinskii* transpiration rate

3.4 采煤塌陷影响下土壤含水量变化对柠条光合作用速率的影响

土壤含水量与柠条叶片光合作用速率的拟合关系见图6，从图6可以看出，通过对土壤体积含水量与光合作用速率进行回归分析得到：硬梁塌陷地、硬梁地对照区、风沙地塌陷区、风沙地塌陷区气孔导度与土壤体积含水量的回归方程分别为：$y=4.7096x-20.6218$($R^2=0.2300$)、$y=4.9231x-25.2264$($R^2=0.4866$)、$y=6.1879x-34.7533$($R^2=0.3999$)、$y=2.2034x-1.9155$($R^2=0.2152$)。从整体来看，光合作用速率与土壤含水量呈正相关关系，光合作用速率随着土壤含水量的增加而增加。采煤塌陷影响下，柠条叶片光合作用速率明显低于对照区，且风沙区柠条光合作用速率受到的影响更大，光合作用速率最低只有 1.12μmol m^{-2} s^{-1}，硬梁塌陷区柠条叶片光合作用速率降低幅度相对较小。说明土壤含水量降低导致了柠条叶片光合作用速率的降低，而风沙区

土壤含水量更低,柠条光合作用速率也就更低。

4 讨论

根据实验结果,土壤水分状况对柠条叶片气孔导度、蒸腾速率以及光合作用速率产生直接影响。特别是对于黄土高原半干旱区,土壤水分无疑是植物生长最重要的限制因素[21],井工开采矿区,地底煤炭开采一方面引起地表塌陷,在地表形成大量裂缝,增加了土壤水分的蒸发面,加速了土壤水的散失[22],同时采煤塌陷破坏了土体结构,不利于土壤水分保持,地表水流失进一步加重;另一方面,由于地下部分被抽空,潜水位埋深降低,影响地下水对地表水的补给[23],此外,根据王力等利用稳定同位素分馏原理,对神东矿区植物水分来源进行研究,结果表明该区域植物水分的主要来源是地下水和土壤水,而基本没有直接利用湖水、水库水以及夏季降水[24-25]。本文采煤塌陷区土壤含水量明显低于对照区,这与邹慧对采煤塌陷条件下土壤水分变化规律研究的结果一致。

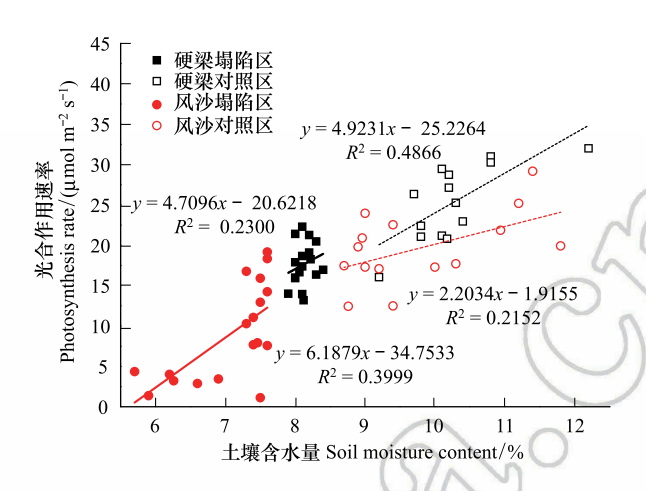


图 6　土壤含水量变化与柠条光合作用速率的关系拟合

Fig.6　Relationship between the changes of soil water content and *Caragana korshinskii* photosynthesis rate

气孔在植物水气和 CO_2交换途径中占据中心位置,是调控"土壤-植物-大气"连续体之间物质和能量交换的关键环节[26],探究气孔导度对煤炭开采引起植物生长的环境因子的变化的响应对于阐明煤炭开采对矿区植物光合作用及蒸腾作用的影响具有重要意义。关于气孔导度与环境因子的关系,已有许多学者对不同植物不同环境条件进行了研究,但是目前还没有得到一致的结论[27],特别是对于采煤塌陷地区。根据本文研究结果,采煤塌陷影响下,使得半干旱矿区土壤含水量降低,加剧了土壤水分胁迫情况,柠条叶片水分无法满足高温下蒸腾的需求,只能降低气孔导度以保证植株体内必要的水分条件,从而导致了塌陷区柠条叶片气孔导度值的降低。因此可以认为半干旱区采煤塌陷影响下土壤含水量降低,为了保持植物体内的水分充足,植物会关闭气孔以维持植物正常的生理活动,这与前人的研究结果一致[28-29]。

植物根系吸收的水分一部分通过叶片蒸腾作用散失,一部分参与植物的生理活动,蒸腾作用对于植物维持体内水分平衡具有重要意义,而土壤水分含量是植物蒸腾速率重要影响因子之一。通常土壤水分供应充足的情况下,影响植物蒸腾速率的主要因子是光照强度。半干旱区地区,光照条件一致的情况下,土壤含水量明显供应不足,采煤沉陷加剧了塌陷区土壤水分胁迫,植物为了减少蒸腾导致的水分散失,增加气孔阻力,从而气孔导度降低,植物蒸腾速率显著降低[30],提高水分利用效率,这是柠条叶片蒸腾速率降低的主要原因。此外,低的蒸腾速率意味着柠条耗水量较小,耐旱性强,可以最大限度的利用有限的水资源来维持生长,这也是柠条被选为神东矿区主要生态修复物种的主要原因。

植物叶片光合作用是植物将光能转变为有机物中化学能的过程,研究植物叶片的光合作用是分析环境因子影响植物生长代谢的重要手段。通常情况下,光合作用速率降低有两方面原因:(1)气孔导度的降低,阻碍了光合作用 CO_2的供应;(2)植物叶肉细胞光能力降低,CO_2利用能力降低,表现为胞间 CO_2浓度升高[31]。为此,本文对 4 块样地气孔限制值以及为胞间 CO_2浓度进行对比分析(图 7)。由图 7 可以看出,两种土壤类型塌陷区胞间 CO_2浓度均低于对照区,风沙和硬梁塌陷区胞间 CO_2浓度分别为 205.73 vpm 和 202.06 vpm,风沙和硬梁对照区胞间 CO_2浓度分别为 228.40 vpm 和 247.89 vpm,说明塌陷区柠条叶肉细胞中 CO_2浓度降低,叶肉细胞光能力并没有降低;两种土壤类型塌陷区气孔限制值均高于对照区,风沙和硬梁塌陷区柠条叶片气孔限制值分别为 0.476 和 0.488,风沙和硬梁对照区胞间 CO_2浓度分别为 0.426 和 0.380,说明受采煤塌陷影响,土壤含水量降低,柠条受到干旱胁迫,为了维持体内水分平衡,减少水分散失,气孔限制值升高,阻碍了光合作用 CO_2的供应,从而导致柠条叶片光合作用速率的降低。

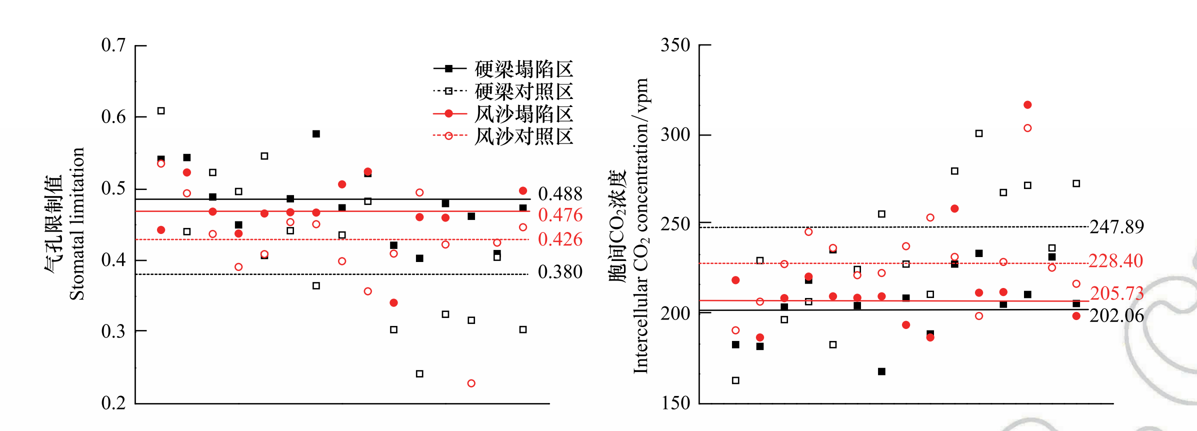


图7 采煤塌陷影响下柠条叶片胞间 CO_2 浓度与气孔限制值的变化

Fig.7 Changes of intercellular CO_2 concentration and stomatal limitation in *Caragana korshinskii* leaves under the influence of coal mining subsidence

采煤沉陷引起地表土壤环境的变化,植物为了应对土壤环境因子的变化调整气孔导度、蒸腾以及光合作用速率以改变叶片的代谢活动,这必定是一个交互影响过程,它们共同影响植物物质和能量的积累[32],进而影响矿区植物的生长。煤炭井工开采对土壤环境的影响十分复杂,土壤含水量降低是采煤塌陷影响结果之一,本文仅从采煤沉陷对土壤含水量影响的角度对柠条气孔导度、蒸腾与光合作用速率与土壤含水量变化的响应进行分析,对于采煤沉陷导致的土壤其他环境因子的变化对植物气孔导度、蒸腾与光合作用速率的影响还有待进一步研究。

5 结论

(1)通过采煤沉陷过程植物根系土壤剖面水分速测仪连续监测结果得到:采煤沉陷影响下土壤含水量均低于沉陷初期;通过表层0—20cm土壤含水量统计分析得到:相对于对照区,硬梁塌陷区土壤含水量降低了18.61%,风沙塌陷区土壤含水量降低了21.12%。土壤含水量的降低原因:煤炭井工开采在地表形成大量裂缝,增加了土壤水分的蒸发面,加速了土壤水的散失;采煤塌陷破坏了土体结构,不利于土壤水分保持,地表水流失进一步加重;地下部分被抽空,潜水位埋深降低,影响地下水对地表水的补给。

(2)通过对土壤含水量与柠条叶片气孔导度、蒸腾和光合作用速率进行回归分析得到:柠条叶片气孔导度、蒸腾和光合作用速率均与土壤含水量呈正相关关系。采煤塌陷影响下,半干旱矿区土壤含水量降低,气孔阻力升高,气孔导度值降低,蒸腾速率降低,光合作用速率降低。原因在于:煤炭开采沉陷增加了地表水分散失,加剧了土壤水分胁迫程度,为了减少蒸腾导致的水分散失,柠条叶片气孔阻力增加,从而气孔导度降低,阻碍了光合作用 CO_2 的供应,从而导致柠条叶片光合作用速率的降低,蒸腾速率也显著降低。

参考文献(References):

[1] 卞正富. 我国煤矿区土地复垦与生态重建研究. 资源·产业, 2005, 7(2): 18-24.
[2] 张发旺, 侯新伟, 韩占涛, 杨会峰, 宋亚欣. 采煤塌陷对土壤质量的影响效应及保护技术. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 67-70.
[3] 雷少刚, 卞正富. 西部干旱区煤炭开采环境影响研究. 生态学报, 2014, 34(11): 2837-2843.
[4] Ristović I. Environmental risks to air, water and soil due to the coal mining process//Meško G, Dimitrijević D, Fields C, eds. Understanding and Managing Threats to the Environment in South Eastern Europe. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, vol 2. Dordrecht: Springer, 2011: 251-264.
[5] 杜涛, 毕银丽, 邹慧, 郑娇龙, 刘生. 地表裂缝对沙柳根际微生物和酶活性的影响. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2221-2226.
[6] 丁玉龙, 雷少刚, 卞正富, 郄晨龙. 开采沉陷区四合木根系抗变形能力分析. 中国矿业大学学报, 2013, 42(6): 970-974, 981-981.
[7] Pandey B, Agrawal M, Singh S. Coal mining activities change plant community structure due to air pollution and soil degradation. Ecotoxicology, 2014, 23(8): 1474-1483.

[8] Mukhopadhyay S, Maiti S K, Masto R E. Use of Reclaimed Mine Soil Index (RMSI) for screening of tree species for reclamation of coal mine degraded land. Ecological Engineering, 2013, 57: 133-142.

[9] 钱者东, 秦卫华, 沈明霞, 杨昉婧. 毛乌素沙地煤矿开采对植被景观的影响. 水土保持通报, 2014, 34(5): 299-303.

[10] 吴立新, 马保东, 刘善军. 基于 SPOT 卫星 NDVI 数据的神东矿区植被覆盖动态变化分析. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1217-1222.

[11] Huang Y, Tian F, Wang Y J, Wang M, Hu Z L. Effect of coal mining on vegetation disturbance and associated carbon loss. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(5): 2329-2342.

[12] Ranjbarfordoei A, Samson R, Van Damme P, Lemeur R. Effects of drought stress induced by polyethylene glycol on pigment content and photosynthetic gas exchange of *Pistacia Khinjuk* and *P. Mutica*. Photosynthetica, 2000, 38(3): 443-447.

[13] Lotter D, Valentine A J, Van Garderen E A, Tadross M. Physiological responses of a fynbos legume, aspalathus linearis to drought stress. South African Journal of Botany, 2014, 94(3): 218-223.

[14] Yordanov I, Velikova V, Tsonev T. Plant responses to drought, acclimation, and stress tolerance. Photosynthetica, 2000, 38(2): 171-186.

[15] Miyashita K, Tanakamaru S, Maitani T, Kimura K. Recovery responses of photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance in kidney bean following drought stress. Environmental and Experimental Botany, 2005, 53(2): 205-214.

[16] 兰伯斯, 祭平, 庞斯. 植物生理生态学. 张国平, 周伟军, 译. 杭州: 浙江大学出版社, 2005: 18-18.

[17] Medrano H, Escalona J M, Bota J, Gulías J, Flexas J. Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: Stomatal conductance as a reference parameter. Annals of Botany, 2002, 89(7): 895-905.

[18] 张大龙, 常毅博, 李建明, 张中典, 潘铜华, 杜清洁, 郑刚. 大棚甜瓜蒸腾规律及其影响因子. 生态学报, 2014, 34(4): 953-962.

[19] 郎莹, 汪明. 春、夏季土壤水分对连翘光合作用的影响. 生态学报, 2015, 35(9): 3043-3051.

[20] 何国清, 杨伦. 矿山开采沉陷学. 徐州:中国矿业大学出版社, 1991.

[21] Bian Z F, Lei S G, Inyang H I, Chang L Q, Zhang R C, Zhou C J, He X. Integrated method of RS and GPR for monitoring the changes in the soil moisture and groundwater environment due to underground coal mining. Environmental Geology, 2009, 57(1): 131-142.

[22] 邹慧. 神东风积沙区煤炭开采对土壤水分运移规律的影响[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.

[23] 李王成. 石羊河流域中游土壤水分运动规律试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2007.

[24] 王力, 卫三平, 张青峰, 王全九, 李世清. 榆神府矿区土壤-植被-大气系统中水分的稳定性同位素特征. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1347-1353.

[25] 王力, 卫三平, 王全九. 榆神府煤田开采对地下水和植被的影响. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1408-1414.

[26] 唐凤德, 武耀祥, 韩士杰, 张军辉. 长白山阔叶红松林叶片气孔导度与环境因子的关系. 生态学报, 2008, 28(11): 5649-5655.

[27] 杨泽粟, 张强, 郝小翠, 阳伏林. 半干旱雨养地区春小麦气孔导度和胞间 CO_2 浓度对环境因子的响应. 科学技术与工程, 2014, 14(33): 20-27.

[28] Elsharkaway M A, Cock J H. Water Use Efficiency of Cassava. I. Effects of air humidity and water stress on stomatal conductance and gas exchange. Crop Science, 1984, 24(3): 497-502.

[29] 左应梅, 陈秋波, 邓权权, 唐建, 罗海伟, 巫铁凯, 杨重法. 土壤水分、光照和空气湿度对木薯气孔导度的影响. 生态学杂志, 2011, 30(4): 689-693.

[30] 张淑勇, 夏江宝, 张光灿, 周泽福. 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级. 生态学报, 2014, 34(10): 2519-2528.

[31] 卢从明, 张其德, 匡廷云, 王忠, 高煜珠. 水分胁迫抑制水稻光合作用的机理. 作物学报, 1994, 20(5): 601-606.

[32] 吴大千, 徐飞, 郭卫华, 王仁卿, 张治国. 中国北方城市常见绿化植物夏季气孔导度影响因素及模型比较. 生态学报, 2007, 27(10): 4141-4148.